

万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势

尹浩, 梁健, 孙建华, 梁楠

中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊 065000

摘要 科学超深井是中国发展能源战略和“透明地球”的重要组成部分, 钻杆柱作为科学超深井实施的关键技术, 其优化配置是万米深部钻探工程顺利完成的重要保障。针对如何科学选配钻杆柱以应对万米钻深的需求, 通过超深井钻杆柱面临的技术挑战分析, 考虑钻杆柱整体强度、密封性能和使用过程中的持续稳定性, 结合大强重比管材技术、复合钻杆柱技术、接头优配技术、钻杆制造技术、涂层防护技术、动力学分析和钻杆智能化等7个关键技术, 给出了万米科学钻探钻杆柱的优化配置方案, 明确了超深井钻杆柱未来发展趋势。

关键词 钻杆柱配置; 科学钻探; 万米工况; 关键技术

为加快“透明地球”技术体系建设和响应碳达峰、碳中和理念下对干热岩、可燃冰等清洁能源的需求, 万米科学钻探工程作为获取深地实物资料和验证重要地质理论的关键技术手段, 其安全、高效的实施具有重大的科学意义。作为地球深部探测的核心与关键, 钻杆柱是连通地面钻探设备与井底碎岩工具的超长径比柔性杆件, 由成百上千根钻杆组成, 发挥着传递扭矩、控制钻压、输送泥浆、提取岩心、更换钻头及处理事故的基本功能, 其优化配置的水平高低直接影响着自身整体强度和密封性能, 是实现其基本功能和钻井工程顺利开展的重要

保障^[1-3]。对于钻杆柱的配置, 一般取决于钻井深度和井身结构。当井深增加时, 钻杆柱的自重及与井壁的磨阻增加; 当井身结构对应大斜度井、定向井及大洋无隔水管钻井时, 钻杆柱受到的孔壁约束条件变的更加复杂, 这导致钻杆柱的服役条件愈发恶劣, 受力复杂, 失效形式多变。对此, 前人分别从钻杆柱的材质、结构、力学行为等提高其配置的方面进行了研究。在钻杆柱材质方面, 形成了系列的API钢级管材^[4]; 在钻杆柱结构方面, 对于钻柱组合与接头结构设计, 形成了标准的规范作法^[5]; 在力学行为方面, 对钻杆柱的运动形态、振动形式等开展

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 中国地质科学院勘探技术研究所管科技项目(YB202201); 国家重点研发计划项目(2018YFC0603403); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221721)

作者简介: 尹浩, 工程师, 研究方向为钻探技术和钻具产品开发, 电子信箱: yhao@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 尹浩, 梁健, 孙建华, 等. 万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势[J]. 科技导报, 2023, 41(6): 108-120; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.011

了大量理论研究,但这不足以全面地支撑万米钻杆柱优化配置的顺利实施。

为了突破大深度复杂地层下井眼轨迹复杂、井身结构级数多、规程参数敏感、扭矩高、自重大、施工周期长导致的恶劣的外部载荷、地温梯度、环境介质对万米以深钻杆柱使用性能的限制,助力深部探测“更进一尺”,本研究通过开展常规钻杆柱与超深井钻杆柱的工况对比分析,提出超深井钻杆柱面临的技术挑战,全面阐述系统提升钻杆柱服役能

力、预防失效的优化配置方案与思路。

1 超深井钻杆柱面临的技术挑战

结合万米科学超深井钻井工况与工艺需求,钻杆柱需要应对大深度钻井内旋转钻进和频繁起下钻的作业工序,这导致其受到的高压、高温以及高应力作用更加剧烈(表1),并因此来了更严峻的技术挑战。

表1 常规钻杆柱与超深井钻杆柱服役工况对比

钻杆柱类型	服役深度/m	服役温度/°C	内外压差/MPa	自重/kN	扭矩/(kN·m)
常规钻杆柱	< 6000	< 150	15~20	< 2000	< 6
超深井钻杆柱	≥6000	≥150	> 20	≥2000	≥6
万米超深井钻杆柱	≥10000	≥250	> 40	2200~3200	≥10

随着井深增加,钻杆柱受力情况越来越苛刻,失效次数增多,统计结果表明^[6],螺纹连接是钻杆柱最薄弱的环节,过量变形、断裂和表面损伤是超深井钻杆柱最频繁发生的失效形式,如图1所示。



(a) 接头过量变形 (b) 管体断裂 (c) 管体表面损伤

图1 钻杆柱常见失效形式示意

1) 过量变形:相对于常规钻杆柱,万米钻杆柱自重大、磨阻高,工作过程中应力应变大,这将导致其结构薄弱点因材料屈服强度不足及局部结构应力集中而发生塑性变形,例如接头螺纹部分轴向伸长、台肩面喇叭口胀扣、管体弯曲等。

2) 断裂:在长期服役的过程中,由超过抗拉强度而发生的过载断裂、由内部裂纹缺陷和韧性低导致的低应力脆断、由应力腐蚀裂纹的扩展而引起的应力腐蚀断裂、由外力产生应变使腐蚀穿过晶粒而引起的应力腐蚀断裂、由应力集中而产生裂纹并裂纹扩展而产生的疲劳断裂、由交变应力和环境腐蚀共同作用下在应力集中区或表面腐蚀坑处发生的

腐蚀疲劳断裂,随着高温、高压、高应力的作用而发生频率骤增。

3) 表面损伤:相对于常规钻井,超深井超长的泥浆循环通道产生的高压耗、超长钻杆柱与复杂轨迹井壁的碰撞加剧了钻杆柱的表面损伤,包括腐蚀、磨损及机械损伤导致的钻杆表面缺失,加剧了杆体内部裂纹产生及密封性失效过程,是导致管体和螺纹在某处刺漏或断裂的主要原因^[7-8]。

2 钻杆柱优化配置方案

面对上述技术挑战,高性能管材研发、复合钻杆柱组合及螺纹连接结构优化设计是解决过量变形这一失效问题的突破口,大批量钻杆现场科学化、智能化管理和井下钻杆柱动力学行为控制是降低钻杆柱因过度疲劳而发生断裂的有效途径,表面涂层涂覆的实施是提高钻杆柱表面抗磨耐蚀性能、降低表面损伤、延长服役寿命的直接手段。因此,为了全面提升钻杆柱服役能力、预防失效,在进行钻杆柱配置时,从入场前的钻杆柱选型、制造,到钻杆柱到达井场后的井下行为控制和井场内的科学智能管理,全面地从材质、设计、制造、力学行为、科学智能管理等方面对钻杆柱配置涉及的大强重比

管材技术、复合钻杆柱技术、接头优配技术、钻杆制造技术、涂层防护技术、动力学分析和钻杆智能化等7个关键技术进行论述,为万米科学钻探工程实

施过程中的钻杆柱配置提供高效、全面的解决方案,保证钻杆柱的服役能力,配置方案设计思路见图2。

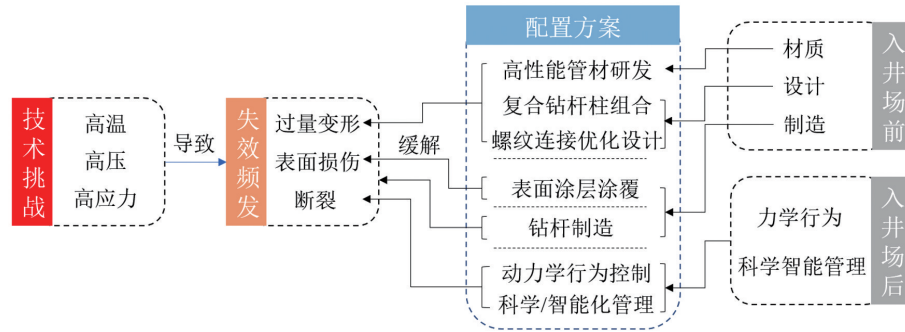


图2 钻杆柱配置方案设计思路

2.1 大强重比管材

为达到万米以深的钻深,最直接的方案就是选用高强度或低密度钻杆管材(即提高自身屈服强度或降低重力),因此,强重比是衡量万米深井用管材的基本指标,通过选用较高强重比管材,大幅提高同规格管材强度或减小管柱自重,达到提升钻杆柱钻深能力和降低自身应力水平的目的。根据材料的不同,钻杆管材可以分为钢制管材和非钢管材2类,对其机械性能提升方面,相关单位开展了深入研究,并取得了显著成果,为其强重比提升及在万

米科学钻探中的应用奠定了基础。

2.1.1 高性能钢制管材

对于钢制管材,因其工艺成熟、价格便宜而被广泛应用于钻杆制造中。对于无缝热轧管的强度提高方面,天钢、宝钢、渤海能克等公司克服设备和工艺难题,优化热处理工艺,成功研制出S-135、Z-140、V-150和W-170钢级管材;对于无缝冷拔管,中国地质科学院勘探技术研究所牵头成功研发XJY950、ZT950管材,相关材料性能见表2^[9-10]。

表2 高性能无缝钢管机械性能

钢级	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	夏比冲击功/J (试样截面 10 mm×10 mm, 常温)	强重比/(10 ⁵ N·m·kg ⁻¹)
S-135	931	≥1050	18.5	≥110	1.19
Z-140	965~1127	≥1050	18.5	≥100	1.23
V-150	1034~1138	≥1103	≥11	≥80	1.32
W-170	1172~1310	≥1241	≥11	≥90	1.49
XJY950	≥950	≥1050	≥15	≥80	1.21
ZT950	≥1046	≥1112	≥16	≥102	1.33

2.1.2 非钢管材

对于非钢管材,主要是指轻合金,其以密度小、强重比大的显著优点适用于超深井钻杆柱,实现钻杆柱服役深度的进一步延伸。受限于基础工业水平和经济成本控制,目前实现工程应用的轻合金钻杆主要为铝合金管材与钛合金管材,但受自身成本

限制,轻合金钻杆仅在硫化氢钻井、大曲率定向井、科学超深井及海洋科学钻探井等对管材、施工周期等有特殊要求的钻井中有所应用。以φ127 mm高性能石油钻杆为例,采用低碳钢、铝合金、钛合金分别制造相同长度钻杆柱的成本比约为1:3:10。

铝合金管材密度小、重量轻、比强度高、弹性变

形大,所需回转扭矩小、抗冲击能力强、耐腐蚀性好、与井壁间摩擦阻力小、易于搬运,是深井、超深井钻杆柱优选配置方案,但其力学性能对温度变化敏感、表面耐磨性差、耐高温性差,这成为制约铝合金

钻杆进一步推广应用的瓶颈^[11-13]。在科拉科学超深钻井、松科二井等工程中研发井下井应用的铝合金钻杆管材力学性能参数见表3。

表3 铝合金管材性能参数

合金牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	耐高温能力/°C	强重比/(10 ⁵ N·m·kg ⁻¹)
D16T	300	460	12.0	< 160	1.08
AK4-1	280	410	8.0	< 220	1.01
01953	490	530	7.0	< 120	1.76
2618	324	367	17.1	< 250	1.17
2024	345	430	14.5	< 180	1.24
7E04	585	645	10.2	< 120	2.10

钛合金管材密度小,强重比高,耐腐蚀性能优异,中高温力学性能好,具有优良的抗疲劳和蠕变性能,且制造工艺成熟,兼具钢材和复合材料优点于一身,虽然制造成本高,但对于万米科学钻探、海洋科学钻探等钻探风险、技术和资金密集型工程,

具有巨大的应用潜力^[14-15]。美国RMI、NOV Grant Prideco、RTI国际金属公司及国内西部钛业有限责任公司、中世钛业有限公司相关单位研制的钛合金管材性能参数见表4。

表4 钛合金材料性能参数

合金材料	ASTM标准等级	屈服强度/MPa	强重比/(10 ⁵ N·m·kg ⁻¹)
TB9/Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	19	895~1172	1.97
TC19/Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	—	965~1103	2.13
TC4(ELI)/Ti-6Al-4V(ELI)	23	758	1.67
TC23(ELI) / Ti-6Al-4V-0.1Ru(ELI)	29	758	1.67
TA26/Ti-3Al-2.5V-0.1Ru	28	482~552	1.06

根据管柱在给定安全系数下的许用拉力等于管柱在泥浆中的浮重,可得

$$\frac{\sigma_s A}{n} = 10^{-6} \rho g l A a \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right)$$

即

$$l = 10^6 \frac{\sigma_s}{n g a (\rho - \rho_0)}$$

式中, l 为管柱许用深度,m; σ_s 为管材屈服强度,MPa; n 为安全系数; g 为重力系数,N/kg; ρ_0 为泥浆密度,kg/m³; ρ 为管材密度,钢钻杆密度为7.85 kg/m³,钛合金钻杆密度为4.54 kg/m³,铝合金钻杆密度为2.78 kg/m³; A 为管材横截面积,mm²; a 为接头加重系数,钢钻杆、钛合金钻杆该值取1.05,铝合金钻

杆该值取1.4。

设定安全系数为2、泥浆密度为1100 kg/m³,并结合表1~表3管材性能参数,可对不同API钢级、高钢级、铝合金、钛合金等材料管柱的可钻深度进行对比分析,如图3所示。从图3中可以看出,万米深井对单规格钛合金管材要求的强重比需达到1.67×10⁵ N·m/kg以上,对单规格铝合金管材要求的强重比需达到1.73×10⁵ N·m/kg以上,单规格钢制钻杆无法在要求的安全范围内满足万米钻深。

2.2 复合钻杆柱技术

由于自重限制,单一规格钻杆柱许用深度有限,难以兼顾安全系数的前提下满足万米钻深设计要求。复合钻杆柱技术采用排队选用多种规格、材

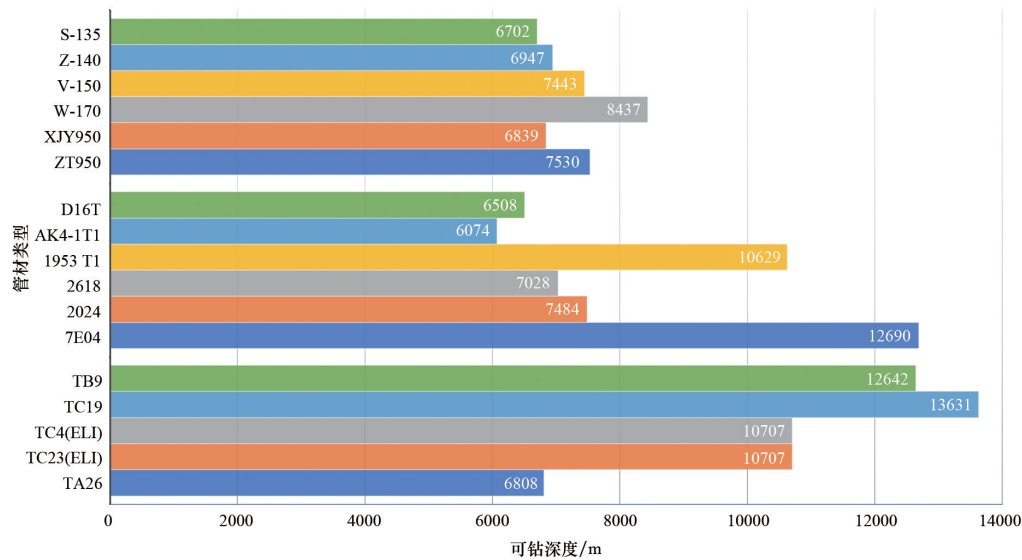


图3 管柱可钻深度对比分析

质或钢级的钻杆组合成复合钻杆柱,通过减轻下部钻杆柱重力而降低上部钻杆柱负重、提高上部钻杆柱强度而减小下部钻杆柱强度,实现钻杆柱总体安全性与经济性的改善,在降低施工成本的同时,保证安全顺利的成井^[16]。苏联CF-3井、德国大陆科学钻探(KTB)超深井的钻柱组合见表5,通过采用上强下弱、上大下小的钻杆柱组合,实现了超深井钻探。

表5 CF-3和KTB超深井钻柱组合

井名	级数	钻杆材质	规格 (外径/mm×壁厚/mm)	使用长度 /m
CF-3	0	BHA	—	40
	1	钢制	140×9	150
	2	AK4-1	147×11	2800
	3	AK4-1	147×13	1005
	4	D16T	147×15	1205
	5	01953	147×11	1200
	6	01953	147×13	1400
	7	01953	147×15	1450
	8	01953	147×17	1100
9	钢制	140×11	1650	
KTB	0	BHA	—	72
	1	HWDP	88.9×18.20	105
	2	S-135	88.9×11.4	1267
	3	S-135	139.7×10.54	1602
	4	U-145	139.7×14.00	2879
	5	U-145	139.7×16.20	1874
6	U-145	139.7×19.05	1302	

进行钻柱组合时,需要考虑钻杆柱总重、制造成本、规格数量、安全系数、拉力余量等指标,以期达到设计要求。通过以下原则结合实际工程情况对各指标进行权重分析和取舍:

1) 钻杆柱总重量主要由规格尺寸、材质和钻杆根数决定,影响地表钻探设备能耗与安全性;

2) 制造成本主要由钻杆材质、种类数量和重量决定;

3) 规格数量影响现场钻杆管理维护成本、施工操作难与钻杆柱整体应力分布,规格数量多可以提高钻杆柱整体安全系数,但不利于井场钻杆的使用、统计、管理与维护;

4) 安全系数是钻杆柱需要满足的根本要求,根据钻深、地层情况等钻探工况确定合理的钻杆柱安全系数,过高的安全系数将导致钻杆规格数量、制造成本增多,一般中深井按安全系数为1.5确定钻杆应用深度,深井及工况复杂的钻井按安全系数为2.0确定钻杆应用深度;

5) 拉力余量代表着钻杆柱应对井内事故的能力,是钻杆柱设计的关键指标,过高将导致钻探成本增多。

2.3 接头优配技术

钻杆接头承担着将单根钻杆串联成柱的作用,采用旋转台肩式螺纹结构。作为变截面异构体,螺

纹连接的几何特征(例如圆角、孔、台肩)导致应力分布集中,成为钻杆柱的薄弱环节。因此,钻杆接头类型选配决定着钻杆柱在平衡其自重后的剩余强度和应付井内复杂情况的能力,其规格与性能直接决定着钻杆柱的适用钻井口径、整体强度和使用极限深度^[17]。万米以深钻探的进尺效率低、循环压耗大,通过减小钻杆接头规格尺寸、提高机械性能,对于优化钻井口径、降低泥浆循环压耗、提高作业安全性是有必要的^[18]。

国内外研究机构、生产厂家开展了大量研究工作,在原有石油、地质行业标准的常规钻杆基础上,大大提升了钻杆接头的机械强度和使用寿命。

对于石油钻杆,NOV Grant Prideco公司、江苏曙光华阳钻具有限公司、渤海能克钻杆有限公司、上海海隆石油钻具有限公司等钻杆供应商在API旋转台肩螺纹接头的基础上,研制了双台肩螺纹接头、滚压螺纹接头、小锥度螺纹接头、长锥面螺纹接头,在抗扭能力、抗疲劳能力、密封能力、水利性能、上扣效率上均相对于常规接头有所提升,并均形成了各自的系列化产品^[19],如图4所示。

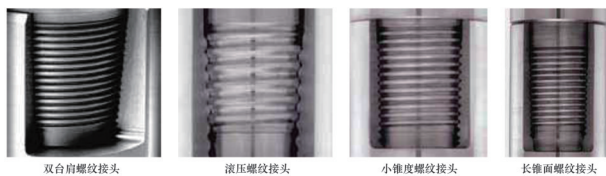


图4 基于API旋转台肩螺纹的高性能接头

对于地质岩心钻杆,由于小口径满眼钻进工艺限制,绳索取心钻杆接头与杆体基本内外平,接头内外加厚量受到限制,在抗弯能力、密封能力以及螺纹优化等方法,国内外相关单位开展了大量研究工作。

1) 采用“大头紧、小头松”结构,提高接头抗弯能力。

国家标准“地质岩心钻探钻具“(GB/T 16950—2014)规定的通用I型绳索取心钻杆接头,内螺纹锥度1:28.65,外螺纹锥度1:27.28,这样配合旋紧后的接头大端受到径向预紧,提高了抗弯能力^[20]。

2) 采用正紧密距结构,提高接头抗扭能力。

由于地质钻杆接头基体厚度有限,台肩面因面积小而抗压能力有限,因此在公、母接头上扣旋紧过程中,当公、母螺纹产生螺纹牙侧面挤压力时,主台肩面还未接触,这种正紧密距的设计,降低了上扣扭矩及工作扭矩作用下对台肩面的强度要求。

3) 进行表面高频淬火处理,提高螺纹副抗磨损能力。

Boart Longyear采用公螺纹硬化处理方案^[21],30次上卸扣后,经过表面硬化的公螺纹(硬度HRC 60)表现出良好的抗磨能力,对应的母螺纹(硬度HRC 30)仅产生少量磨损,如图5所示;30次上卸扣后,未经过表面硬化的公接头螺纹与母接头螺纹(硬度HRC 30)均出现黏着磨损,导致螺纹磨损和卡黏,如图6所示。

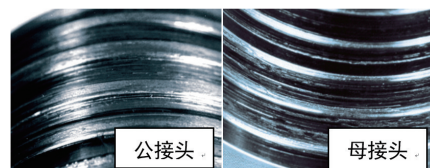


图5 淬火处理螺纹上卸扣磨损情况

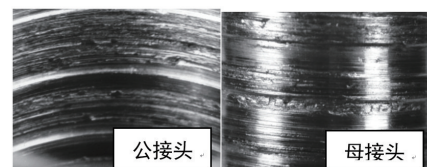


图6 未处理螺纹上卸扣磨损情况

4) 进行螺纹牙型优化,改善接头力学性能。

Kalantari等^[22]提出了使用不同螺纹根部圆角半径优化螺纹应力分布、最大化螺纹接触面积的方案。Boart Longyear及国内中地装(无锡)钻探工具有限公司的地质钻杆产品通过螺纹牙形优化^[23],包括对称梯形牙型角、非对称梯形牙型角、负角度梯形牙型角、三角牙型角等,实现对抗扭、耐密封等性能的改善,如图7所示。

5) 进行螺纹锥度优化,改善接头受力情况。

螺纹锥度的适当减小,使应力分布更均匀,接头抗扭强度提高,尤其是内外加厚量有限制的地质钻杆接头。

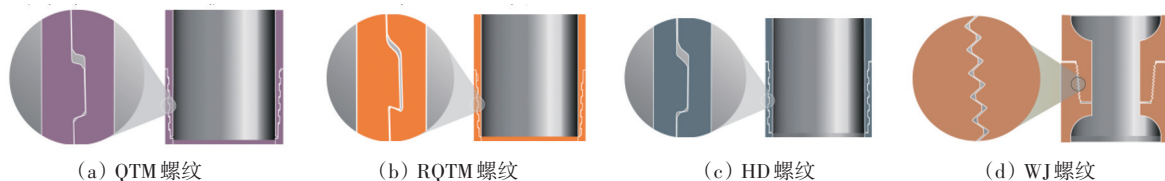


图7 地质钻杆接头螺纹牙型示意

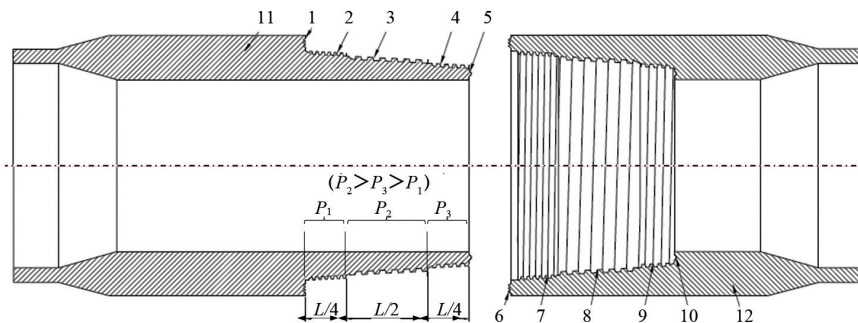
6) 优化副台肩间隙,改善螺纹应力分布。

对于采用副台肩结构形成双台肩的钻杆接头在面临超深井和万米特深井复杂工况时,副台肩间隙对接头应力分布特征和抗扭性能有一定的影响,合理确定适合超深井服役工况的双台肩钻杆接头副台肩间隙对改善螺纹应力分布有显著效果^[24-25]。

综上,考虑钻探效率、水力性能等随着钻深增加而降低,万米科学钻探钻杆柱使用小口径薄壁钻杆是一种推荐的解决方案,这将大大降低碎岩面积与循环压耗。在万米工况下,大通径、薄壁的约束

条件,使得钻杆接头的应力集中问题成为限制其结构强度的瓶颈,而上述结构均不能有效解决螺纹应力集中问题。

对于螺纹应力集中问题,使用三台肩结构、不等螺距结构^[26](图8)、不等牙宽结构等控制内外螺纹牙进入工作承载的顺序,实现螺纹两端应力集中缓解(图9),是后续接头结构优化的一个研究方向,这将推进万米以深高性能钻杆柱的研究工作,进一步提高钻杆接头应对恶劣工况的能力和钻井的安全。



1,6—主台肩;2,7—前螺纹段;3,8—中螺纹段;4,9—后螺纹段;5,10—副台肩;11—公接头;12—母接头; P_1 —前螺纹螺距; P_2 —中螺纹螺距; P_3 —后螺纹螺距; L —螺纹轴向长度

图8 三段式不等螺距螺纹副结构示意

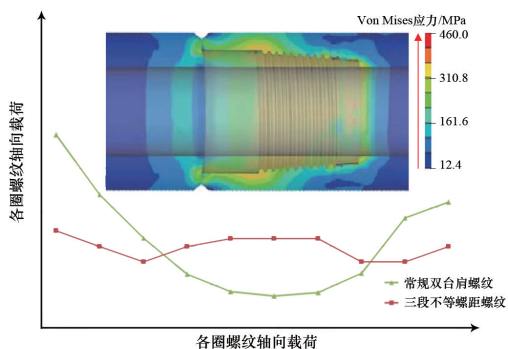


图9 接头应力集中分布云图及曲线

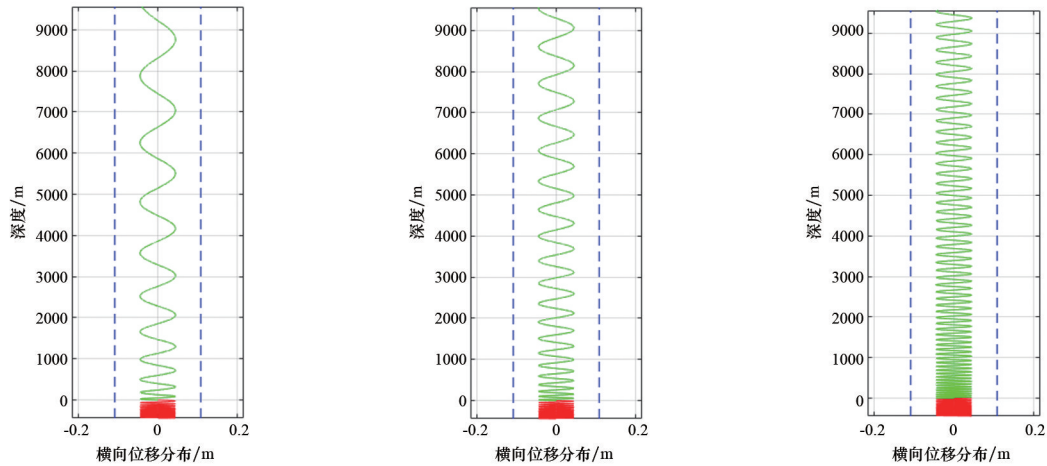
2.4 钻杆制造技术

钻杆制造涉及热处理工艺与形位尺寸公差的控制,对于满足不同工艺的石油钻杆和地质绳索取心钻杆,制造工艺流程不尽相同。

对于石油钻杆,考虑成井口径需求、设备提升能力及服役钻杆螺旋弯曲的特性,为减小钻杆弯曲程度、预留合适的磨损余量,钻杆呈现为细杆体、粗接头的结构特点,若采用一体结构,或者需要车削中部材料、或者需要大幅墩粗两端尺寸,加工制造成本过高,为此采用接头与杆体分别制造,然后采

用摩擦焊连接的工艺方法。这种方法成本低,但存在接头与杆体的同轴度问题(偏差1~2 mm)。对于常规大井眼低速钻进,是适用的,但对于万米以深的钻探工况,钻杆承受的静载荷、交变载荷、冲击载荷的作用更加复杂,应力状态更加恶劣,由于同轴

度偏差产生的离心力使变节距螺旋状的钻杆柱更加弯曲(图10,萨尔基索夫公式,蓝色虚线为井壁,绿色曲线为中和点以上钻杆柱轴线,红色曲线为中和点以下钻杆柱轴线),其影响将不能被忽略,尤其对钻杆柱转速有较高要求时。



(a) 节距50~960 m(钻杆柱转速 10 r/min) (b) 节距35~482 m(钻杆柱转速 20 r/min) (c) 节距20~162 m(钻杆柱转速 60 r/min)

图10 不同转速的钻杆柱井内变节距弯曲情况示意

为削减摩擦焊产生的同轴度误差,提出以下2种方案:(1) 热轧管制造工艺改进研究,生产满足管体与接头规格尺寸的不等截面管坯;(2) 杆体与接头毛坯(内、外径均相对于设计尺寸预留1~2 mm车削余量)摩擦焊接,然后以管体为基准车、镗外圆、内孔,再加工螺纹;此方案可保证接头与管体的同轴度,但现有磷化处理设备在进行螺纹表面处理时存在空间限制(钻杆单根长9.5 m,磷化处理池见方无法满足钻杆摆放),考虑高频淬火或研发适配于长单根钻杆螺纹表面处理的设备。

对于以获取地下实物资料为目的的地质绳索取心钻杆,接头相对于杆体内外镢粗量适中,从减少接头薄弱点和提高钻杆同轴度的角度考虑,采用

两端镢粗的直联钻杆代替管体与接头摩擦焊接工艺是一种优选方案,相关加工工艺流程见图11,通过此工艺实施而制造的钻杆成功应用于4000 m以深地质岩心钻探工程,如图12所示^[27]。

2.5 涂层防护技术

表面损伤是钻杆失效的主要原因之一,主要包括腐蚀、磨损和机械损伤^[28],在超深井的高温、高压工况下,这种损伤将更快的导致钻杆柱失效。通过钻杆表面附着涂层进行隔离或改性的表面涂层技术,可以改善钻杆表面的耐磨性与抗腐蚀性,能有效减缓钻杆内、外表面损失,是钻杆制造过程中不可或缺的一环。

常用或具有潜力的应用于钻杆的涂层技术包

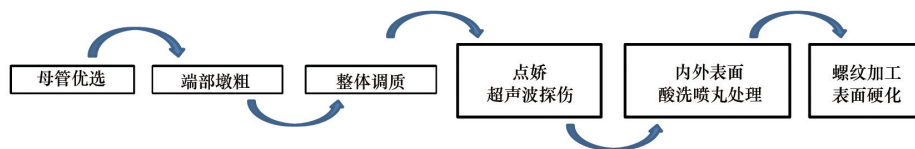


图11 直联式高性能薄壁绳索取心钻杆加工工艺流程



图12 直联式薄壁绳索取心钻杆

括隔离涂覆强化、渗碳或渗氮处理、表面阳极氧化、超声波冷锻、超音速火焰喷涂等^[29]。

隔离涂覆强化主要是通过通过在表面涂覆环氧酚醛等柔韧性、附着力较好的化学材料,实现钻杆与泥浆的隔离,可有效防腐,提高水力效率与使用寿命,但耐磨性不好,常用于钻杆内涂层,为石油钻杆常用涂层技术。

渗碳或渗氮处理与表面阳极氧化均为化学表面强化。渗碳或渗氮处理是在高温下通过扩散向钻杆材料表面渗入碳或氮,在表面生成含有陶瓷相的硬质层,实现硬度和耐磨性提高的方法;表面阳极氧化将钻杆本体材料置于酸性电解液中,与外接电源作用下作为阳极,在试件表面形成与基体结合牢固的氧化层,通过改性工艺形成的氧化层具有较高硬度并与基体结合牢固,经验证对铝合金钻杆表面的耐磨、耐腐蚀性能有所提高^[30]。

超声波冷锻技术是机械表面强化的一种,通过冲头(球)作用在材料表面释放超声振动能,使材料表面发生剧烈塑性变形以实现表面纳米化,形成耐磨抗蚀保护层^[30]。

超声速火焰喷涂技术属于载能束表面处理,通过热源产生高温高压的焰流从而熔化喷涂材料实现表面处理,涂覆在接头外表面,可起到耐蚀抗磨与抗粘扣的作用^[31-32]。

综上,钻杆涂层技术的研究及在钻杆制造领域的推广与工业化,对钻杆柱应对高温、高压、高腐蚀、高磨阻等服役工况起到至关重要的作用,尤其是铝合金钻杆。

2.6 动力学分析

管柱动力学研究已有70多年的历程,取得的诸多理论研究成果为优化钻柱结构、井下钻柱行为控制、钻柱失效原因分析奠定了坚实的理论基础。

因此,开展钻杆柱动力学分析,对预防钻杆柱失效以及提高钻杆柱使用寿命,具有重要工程意义^[33]。

在钻井过程中,由于井眼约束、工况复杂、工艺要求等因素,作用在钻杆柱上的钻头反扭、井身磨阻、循环泥浆、吊打拉力等外加激励存在不同程度的交变,导致钻杆柱发生机械振动,这是导致钻杆柱失效的主要原因。通过钻柱动力学分析,揭示钻柱断裂、疲劳破坏的机制,提出减少钻具失效的方法和手段,对于提高深井钻井速度、降低钻井成本有重要意义。

钻杆柱振动主要包括自由振动、强迫振动、自激振动、参数振动。对于上述4种振动类型,众多学者开展了产生原因、影响因素、导致结果的研究。自由振动属于阻尼自由振动,主要包括轴向自由振动和扭摆自由振动,这将可能导致钻杆柱脱扣事故;强迫振动是来自钻头破碎井底、泥浆泵脉动、钻杆柱偏心及与井壁接触的周期激励而产生的振动,包括纵向振动、横向弯曲振动和扭摆振动,是导致钻杆柱疲劳失效的主要外部原因;自激振动是钻杆柱转动过程中受到井眼约束而自激产生的横向振动,受转速、摩擦系数、钻杆柱刚度影响,一般出现在钻杆柱与井壁的接触点,会导致钻杆产生强烈涡动,加剧弯曲应力循环频率和碰撞频率;参数振动是钻压波动引发的振动,受泵压波动和钻头纵向振动影响,可导致参数激励频率远小于固有频率时产生大的响应而导致钻杆柱失稳^[34]。

实际钻井过程中,上述各种振动是同时存在的,其耦合作用产生的对钻杆柱的影响模型,基于多种条件简化和假设,且由于动力学方程组的非线性和多参数描述,求解复杂且无法准确揭示井下钻杆柱在狭长井眼内的复杂力学行为,导致相关工程设计控制方法难以解决好实际遇到的许多复杂问题^[35]。因此,应把工作重心从动力学方程的精确求解转移到定量分析各工况因素对钻杆柱井下行为的影响,并结合扭矩仪与机器学习技术开展振动谱分析,识别与捕捉井下钻杆柱行为,指导振动解耦钻柱组合和钻井参数的优化设计,减小激励振幅,避免共振的发生,这将大大提高万米深井用钻杆柱的安全性和稳定性^[36-37]。

2.7 钻杆智能化

万米以深科学钻探工程的实施,将直接面临万米钻杆柱通道内的地表至井底的信息实时传输和上千根钻杆的现场科学化管理问题。

地表至井底的信息实时传输,是保证工作人员对井底数据资料实时掌握并及时反馈和保证施工安全性与高效性的关键。常规泥浆脉冲传输效率低,存在信号衰减与延迟,不能满足密集型数据的传输速率与实时性,尤其对于万米以深特深井,以钻杆柱为传输载体直接进行随钻数据传输方法的实现,对于钻井轨迹控制、井内事故预判及成井效率提升,有重大意义。美国NOV Grant Prideco公司通过钻杆内壁安装电缆、接头非接触感应方式的结构设计,实现了2 Mbit/s的地表与井底双向通信,指令可下传到钻杆柱任一节点,也可从井内钻杆柱任一节点上传到地表,并已形成商业化^[38-40]。

钻杆科学管理,可辅助操作人员及时掌握钻杆使用情况、累计进尺、寿命等关键性信息,对可靠性不足的钻杆及时进行淘汰、更换新钻杆,对于万米以深钻探工程的安全实施尤为重要^[41]。深部钻探用钻杆柱批量大、规格多,钻杆服役过程中经历多种复杂工况和多次的质量检测,高效便捷的记录钻杆的使用情况和检测结果并及时识别,将大大方便钻杆现场管理与钻杆柱的安全下井使用,保证钻杆“从容”面对万米工况的基础保障。为此,通过智能化数字钻杆ID(identity document)识别技术(图13),攻克RFID(radio frequency identification)芯片封装技术,开发智能化钻杆数字管理系统,自动识别钻杆信息,完成钻杆信息数据库的实时更新,从而对提高现场管理效率、实施钻杆智能数字化班报表和实时跟踪使用情况、及时剔除风险单根、掌握各钻杆所处位置情况等,具有一定的工程价值^[42]。

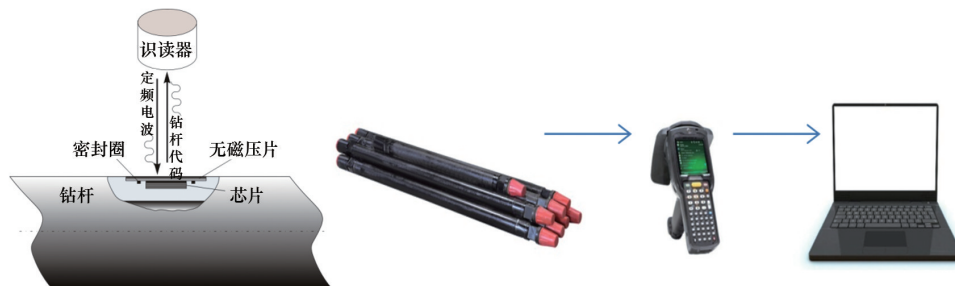


图13 智能化钻杆身份识别原理

3 钻杆柱优化配置未来趋势

上述钻杆柱配置方案,从钻杆柱设计、制造到服役,全流程地解决了超深井钻杆柱性能不足和失效加剧的问题,但是,随着科学钻探工程向陆域更深地层和海洋未知领域的进军,复杂的服役环境对钻杆柱的精细化配置和安全性将会提出更高要求。为此,在现有技术方案的基础上,还需要开展钻杆柱的管材研发、结构优化和智能化研究,达到变革性升级,这是万米科学钻探工程乃至莫霍面钻探计划顺利、高效实施的重要保证。

1) 高性能管材钻杆柱:在管材方面,轻质、高

强、高韧、抗腐蚀管材的研发仍然是重中之重,尤其随着工业化升级,高强度耐温铝合金钻杆和复合材料钻杆将因其良好的抗冲击韧性、耐腐蚀性及轻便性的优点而成为万米科学钻探钻杆柱的必备解决方案。

2) 最优化结构钻杆柱:在选用合适管材的同时,对钻杆串联成柱的组合方式和各钻杆连接位置的结构优化设计研究,是进一步提高钻杆柱整体强度的有效手段。以减缓应力集中、减小刚度突变和降低循环压耗为目的,根据万米以深钻探工况的特殊性,通过权衡总重、成本、规格数量、安全系数、拉力余量的需求程度,结合计算机程序,实现兼顾各

钻井工况下的管柱力学行为安全的钻杆柱组合优化设计和优配接头的钻杆研制,是未来万米特深井钻杆柱的发展趋势。

3) 智能化钻杆柱:常规钻杆无法实现孔内工况参数信息的实时获取、传递,使得操作人员的钻进操作具有一定的滞后性,而智能化钻杆柱具有井下信息传输、自身工况存储和ID识别功能,这将有效解决深井井底数据上传、服役钻柱力学行为监测和批量化钻杆全生命周期管理问题,实现司钻对井下钻进情况、钻柱工况和钻杆质量情况的动态掌控,实时根据孔内环境修正操作和剔除风险单根,提高钻进效率和安全性,大大减少井下事故发生。

4 结论

高温、高压、高应力是万米科学钻探钻杆柱面临的主要技术挑战,由此带来的钻杆柱过量变形、断裂及表面损伤加速了钻杆柱的失效。从材质、设计、制造、力学行为控制、科学智能管理等方面提升钻杆柱服役能力,制定科学的钻杆柱配置方案,预防其在材料、结构、环境和力学的联合作用下因过量变形、断裂或表面损伤而失效,将有效地提升钻杆柱的服役能力。

1) 在材料选择方面,为保证钻杆柱在万米工况下的结构强度与密封性能,高强、高韧、大强重比的管材是钻杆柱配置的首选,管材性能的研究进程将决定钻探极限深度的进一步突破。

2) 在结构设计方面,为降低钻杆柱整体应力水平和缓解应力集中,权衡钻杆柱总重、成本、规格数量、安全系数、拉力余量的需求程度而实现科学、高效、合理的多级钻杆柱组合优化设计和高性能接头结构优化是钻杆柱配置的关键,是保证钻杆柱安全性和“延伸”极限的关键。

3) 在生产制造方面,为提高钻杆柱几何尺寸精度和减少薄弱环节,高水平机械制造技术与表面工程技术有机结合是钻杆柱配置实现的保障,成品钻杆结构尺寸公差控制与涂层防护的实施将全面提高万米钻杆柱的结构安全性、工艺适配性和服役可持续性。

4) 在操作使用方面,为更好控制钻杆柱井下行为、减小激励振幅、避免共振,通过钻柱动力学分析,定量分析各工况因素对钻杆柱井下行为的影响,开展振动谱分析,识别与捕捉井下钻杆柱行为,揭示钻柱断裂、疲劳破坏的机制,指导振动解耦钻柱组合和钻井参数的优化设计,进一步完善钻杆柱配置,将大大提高万米深井用钻杆柱的安全性和稳定性。

5) 在管理维护方面,为实时动态掌握钻杆柱在地表与井下的服役全过程,具有高速信息实时传输和身份识别功能的智能化钻杆技术是实现钻杆柱配置智能化和高效化的有效手段,是了解万米钻井内钻杆柱服役状况和上千根钻杆现场科学化管理的支撑。

6) 未来钻杆柱在管材研发、结构优化和智能化等方面的进一步变革性升级,是保证万米科学钻探工程顺利、高效实施的重要保证。

参考文献 (References)

- [1] 张金昌, 刘秀美. 13000 m 科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 1-6.
- [2] 王达, 张伟, 贾军. 特深科学钻探的关键问题[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2698-2706.
- [3] 张金昌, 谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 887-894.
- [4] 国家能源局. SY/T 5561—2014: 钻杆[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24956—2010 石油天然气工业钻柱设计和操作限度的推荐作法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [6] 宋治, 冯耀荣. 油井管与管柱技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [7] 万里平, 孟英峰, 杨龙, 等. 钻柱失效原因及预防措施[J]. 钻采工艺, 2006, 29(1): 57-59.
- [8] 李鹤林, 冯耀荣. 石油钻柱失效分析及预防措施[J]. 石油机械, 1990, 18(8): 38-44.
- [9] 肖红, 孙建华, 高申友, 等. XJY950 高钢级精密绳索取心钻杆用无缝钢管的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(6): 12-15.
- [10] 李惠娟. 高强度钻杆用钢的研发[J]. 天津冶金, 2019

- (4): 49-51.
- [11] 梁健, 尹浩, 孙建华, 等. 高强耐热铝合金钻杆材料优选[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 65-71.
- [12] 孙建华, 梁健, 王立臣, 等. 深部钻探铝合金钻杆开发应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(4): 34-39.
- [13] 梁健, 彭莉, 孙建华, 等. 地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 304-308.
- [14] 查永进, 胡世杰, 卓鲁斌, 等. 钛合金石油管材应用前景研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(4): 1-3.
- [15] 赵金, 陈绍安, 刘永刚, 等. 高性能钻杆研究进展[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(5): 96-99.
- [16] 尹浩, 梁健, 孙建华. 深钻探钻柱组合优化设计研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 56-62.
- [17] 梁健, 尹浩, 孙建华, 等. 特深孔地质岩心钻探钻口径及管柱规格研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 36-46.
- [18] 尹浩, 梁健, 孙建华, 等. 深部科学钻探钻杆接头优化措施[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 134-139.
- [19] NOV Grant Prideco. Drilling products and services[EB/OL]. [2022-05-31]. [https://wbapps.nov.com/gp/connection-library/connection-library.cshhtml?puid=5EdFzBZ\\$3oL35C](https://wbapps.nov.com/gp/connection-library/connection-library.cshhtml?puid=5EdFzBZ$3oL35C).
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16950—2014: 地质岩心钻探钻具[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [21] Boart Longyear. Drill rod threads: Tips to avoid common problems and improve productivity[EB/OL]. [2022-05-31]. <https://www.boartlongyear.com/insite/drill-rod-threads-tips-avoid-common-problems-improve-productivity/>.
- [22] Kalantari M, Marchand N R. Thread profiles for rotary shouldered connections: EP3262269A1[P]. 2020-09-08.
- [23] Boart Longyear. Coring rods and casing catalog[EB/OL]. [2022-05-31]. https://app.boartlongyear.com/brochures/CoringRodsCasingCatalog_Sep2020.pdf.
- [24] 陈锋, 朱巍, 狄勤丰, 等. 适合特深井的双台肩钻杆接头副台肩间隙的确定[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 90-96.
- [25] 任辉, 高连新, 鲁喜宁, 等. 新型双台肩钻杆接头研究与应用[J]. 石油机械, 2011, 39(3): 63-66.
- [26] 中国地质科学院勘探技术研究所. 一种高抗扭耐高压密封钻杆接头: CN111058779A[P]. 2020-04-24.
- [27] 张金昌, 尹浩, 刘凡柏, 等. 自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J]. 地质论评, 2022, 68(4): 1382-1392.
- [28] 李鹤林, 冯耀荣. 石油钻柱失效分析及预防措施[J]. 石油机械, 1990(8): 7-8, 38-44.
- [29] 周永权, 赵洋, 王璞. 表面强化技术的研究及其应用[J]. 机械管理开发, 2010, 25(5): 104-105.
- [30] 梁健, 岳文, 孙建华, 等. 超声波冷锻与阳极氧化处理铝合金钻杆摩擦学性能研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(3): 576-583.
- [31] Zhou Y K, Liu X B, Kang J J, et al. Corrosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings in the simulated seawater drilling fluid under high pressure[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104338.
- [32] Yin H, Liang J, Ren X Y, et al. Corrosion and wear behavior of WC-10Co4Cr coating under saturated salt drilling fluid[J]. Materials, 2021, 14: 7379.
- [33] 高德利. 复杂井工程力学与设计控制技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- [34] 宋治, 冯荣耀. 油井管与管柱技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [35] 高德利, 黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 620-647.
- [36] Christine I N, Jerome J S. The role of machine learning in drilling operations: A review[C]/SPE Eastern Regional Meeting. Richardson: SPE, 2018: SPE-191823-18ERM-MS.
- [37] Prince O, Juan C V, Roman S. Estimating downhole vibration via machine learning techniques using only surface drilling parameters[C]/SPE Western Regional Meeting. Richardson: SPE, 2019: SPE-195334-MS.
- [38] 胡永建, 黄衍福, 李显义. 磁耦合有缆钻杆关键技术与发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(1): 21-29.
- [39] 闫铁, 许瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(4): 15-21.
- [40] 李根生, 宋先知, 田守增. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 1-8.
- [41] 贾晓亮. 煤矿井下智能钻具管理系统的研究与设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(2): 15-18.
- [42] 金佳骏, 钱松荣. 基于RFID的智能钻杆管理系统[J]. 微型电脑应用, 2015, 31(6): 9-10.

Development trend of drill string optimal configuration in myriametre scientific drilling

YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, LIANG Nan

Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

Abstract Scientific ultra deep well is an important part of energy development strategy and the "transparent earth" project in China. As a key part of scientific ultra deep well, the drill string provides a guarantee for the safe and successful implementation of deep exploration engineering with its optimized configuration. Aiming at scientific selection of drill string for the demand of myriametre drilling depth, and considering the overall strength, sealing performance and continuous stability of drill string in use, this paper discusses seven key technologies based on analysis of technical challenges faced by the drill string in ultra deep well, such as pipe technology of high strength-to-weight ratio, composite drill string technology, joint optimization technology, drill pipe manufacturing technology, coating protection technology, dynamic analysis and intelligent drill string, and proposes the optimized configuration solution of drill string for myriametre scientific drilling. At the same time, the development trend of drill string is analyzed. It defines the research direction of the drill string for myriametre scientific well.

Keywords drill string configuration; scientific drilling; myriametre working condition; key technology ●



(责任编辑 刘志远)